

# 密度依存を考慮した個体数予測のコンピュータシミュレーション —ウリミバエ根絶事業に見る個体数予測—

1. はじめに
2. 生態学における個体数予測
3. パラメータ依存シミュレーションモデル
4. 密度依存シミュレーションモデル
5. 分布を考慮したモデル
6. 結 論

青 村 茂\*  
高 倉 浩 史\*\*

## 要 約

生物集団の個体群動態、中でも特に個体数変動を予測することは生態学的に非常に重要な問題の一つだと考えられ、古くから多くの数理的な取り組みがなされてきた。本研究ではこの数理的な方法をベースに、さらに近年飛躍的な発展を遂げているコンピュータによる数値シミュレーションの要素を加えた個体数変動予測のコンピュータシミュレーションモデルを作成した。ロジスティック差分方程式による離散時間モデルをベースにして密度依存性を考慮した生態系の個体数予測シミュレーションモデルを作成し、さらにそれに年齢構成、固体密度の地域差による環境収容力の分布を考慮してコンピュータシミュレーションを行った。方程式の表すマクロの世界と、シミュレーションの表すミクロの世界とを結びつけることで合理的な個体数予測を実施した。シミュレーションの有効性を確認するために、沖縄におけるウリミバエ根絶事業で得られたウリミバエの生態系データに着目し、これらのうち特に久米島でのデータを用いてモデルの検証を行いその有効性を確認した。

## 1. はじめに

これまで人類は住みやすい社会、快適で便利な生活を目指して様々な技術を飛躍的に進歩・発展させてきた。しかし、その代償として、21世紀を目の前にして地球温暖化や環境汚染等が全世界的

な問題となっている。そしてこの環境変動は、人類を含む自然界における様々な生態系にも非常に大きな影響を与えている。

外的要因による環境の変化等の顕在的变化、長年にわたる化学物質の蓄積による生体の内部的変化等の潜在的変化が要因となって、生物集団の急激な増加や減少につながり、あるときには個体数

\* 東京都立大学大学院工学研究科機械工学専攻

\*\* (株)東芝

の爆発や種の絶滅といったことも従来よりも頻繁にかつ短時間で起こり得る。これら生物個体群の変動は必ずしもいわゆる野山の自然豊かな状況を背景にするとは限らず、害虫の異常発生や希少動物の絶滅等はむしろ大都会やその近郊においてよりドラスティックに起こり得るのである。

このような様々な環境の変動に対する生物集団の個体数の変動を予測することができれば、将来的に起こりうる様々な問題（集団の大爆発や絶滅、そして密集といった現象）に対し、的確に対処することが可能となる。

生物集団の個体群動態、中でも特に個体数変動を予測することは生態学的に非常に重要な問題の一つであり、古くはロトカーボルテラの時代からの長い歴史があり、そこでは方程式を元にしたマクロな手法を用いて個体数全体を予測する研究が数多く行われてきた（May et al.(1974), Hassel (1975)）。特に人口（個体数）予測の最も代表的な方程式にロジスティック方程式があり、多くの研究では、この考え方をベースとして数理的なモデルを作成している。

これらの手法では環境収容力という支配的な値の範囲内で、独立変数としての増殖率と代表値としての総個体数の関係に着目してその安定を論じ、少ない計算で将来に起こり得る変動を見通して成果を収めてきた。従ってそこでは実際には個体数の変動に影響を与えるであろう個体相互間の関係等の局所的な挙動や、年齢構成や寿命、個体の空間分布といったような個々の個体に個性をもたせて識別するような項目については全体数の予測と同じレベルではあまり注意が払われてこなかった。環境の変動がある特定の世代に影響を与える等、モデルへの外乱の多くは局所的に発生し成長することが多く、これらの影響を含めた個体数の予測が望まれている。現在は複雑系等の分野に見られるように、コンピュータの計算能力の飛躍的な増大を背景として、個体間の比較的単純な相互関係からは明示はされないがそれが集団の行動に適用されたとき、秩序ある全体行動の自発的な発現が観測されることが報告されている。生態学においても方程式がマクロに表すトップダウンの世界と、

シミュレーションがミクロに表すボトムアップの世界を結びつけることで、より現実的な個体数変動の予測ができる可能性がある。

以上のことから、本研究では密度依存性を考慮しながら年齢構成と個体分布の局所性を考慮した生態系の個体数予測シミュレーションモデルについて考える。生態に関するシミュレーションモデルの提案では、その検証が一番大きな問題となるが、本研究ではその有効性を検証するための対象として、沖縄・ウリミバエ根絶事業を取り上げる。このウリミバエ根絶事業では、不妊虫放飼法を基にしたプロジェクトを実施するために様々な実験と観測を行い、個対数変動を始めとして通常では得られないような多様なウリミバエの生態についてのデータが得られている。これらのうち特に久米島でのデータを用いてモデルの検証を行う。

## 2. 生態学における個体数予測

### 2. 1 数理生態学と生物の人口曲線(巖佐,1990)

生態学の分野における、これまでに行われてきた個体数予測の研究では、基本的に方程式をベースにしたマクロな変数を用いてその安定、不安定が論じられてきた。生態学の分野で、対象となるシステムの本質的側面を数理モデルとして表現し、数式の解析や計算機シミュレーションによって生命現象を解明するというアプローチが理論生態学もしくは数理生態学と呼ばれるものである。例えばある生物集団の個体数を $N$ と表すと、それは出生と死亡のバランスで変化する。例えば、個体数 $N$ の生物集団が単位時間あたり $m$ の割合だけ増加したとすると、個体数を時間 $t$ の関数と考えて、増加速度 $dN/dt$ は次の方程式によって表すことができる。

$$\frac{dN}{dt} = mN \quad \dots\dots\dots (1)$$

しかし現実には環境の収容力には制限があり、図1(a)に示されるように現実の生物集団がいつまでも指数的に増殖できるはずがない。環境に制限があると、個体数がある程度まで増加すると増殖

率は低下する。それは、個体数が増大するにつれて、それぞれの個体にとっての環境が悪くなり、餌や営巣場所など成長・繁殖に必要な資源が得にくくなると考えられているからである。このことを表すのに有効な方程式が、次のロジスティック方程式である。

$$\frac{dN}{dt} = rN \left( 1 - \frac{N}{K} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

この方程式は、個体数  $N$  が  $K$  よりも小さいと個体数  $N$  は増加傾向を示し、個体数  $N$  が  $K$  よりも大きいと  $N$  は減少傾向を示す。また、個体数  $N$  が  $K$  に一致するときは個体数  $N$  の成長は止まり、図1 (b) に示されるように  $K$  の値に収束する。また、この  $K$  は、その環境中に維持できる個体数という意味から、環境収容力 (carrying capacity) と呼ばれる。これに対して、もう1つのパラメータ  $r$  は、個体数密度が小さくて環境に資源が十分にあるときの増加率を示すので、内的自然増加率 (intrinsic rate of natural increase) という。他にも個体数変動を表す方程式はいくつか存在するが、基本的には最も一般的なロジスティック方程式がベースにあり、それを少しずつ改良していく手法が多い。また生物個体数の増減は巨視的には微分形で表すことができるが、本来、微視的に見れば差分的な性格をもつものであり、この場合には条件によってカオス的な挙動が観察される事が知られている (Bascompte et al. 1994)。

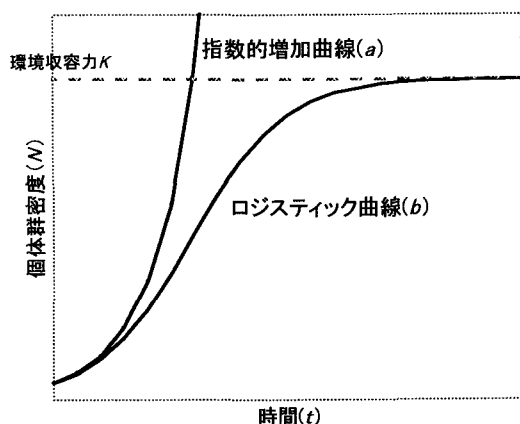


図1 指数的增加曲線とロジスティック曲線

これらの個体数予測手法では代表値として全体個体数に着目し、トップダウン的にその増減を論じているわけであり、局所的な挙動や、年齢構成、個体の空間分布といったようなボトムアップ的な要素については考慮することが出来ない。たとえばモデルに局所的に外乱が加わったときの挙動などを見るためには、このような項目についても考慮したいのである。Deriso (1980) は年齢構成を考慮することによって効率的な漁獲戦略について研究を行っているが、個体の加齢とそのサイズの増加に着目して漁獲高を論じており、個々の要素が全体個体数に与える影響を考慮して予測を行うようなモデルではない。

## 2. 2 環境収容力

生物の個体数は限りなく増加するように見えて、やがて進行する資源の枯渇と共に減少に転ずる。環境収容力はこの上限を生物の個体数で示したものである (巖左、1998)。環境収容力は常に一定とは限らず時間と共に揺らぐ場合もある。人類のように、過去の予想に反して、その自助努力により環境収容力が増し、人口も年々増えているような場合もあれば、年々生息条件の悪化のために環境収容力が縮小するとともにその個体数を減らしている場合もある。また季節的に定期的に変動するような場合もあるし一時的な外乱によりその生息数が激減するような場合もある。このような場合に、環境収容力自体が変動したと考えるのか、あるいは環境収容力は変わらないが一時的な外乱のために個体数の増減が起きたと考えるかは判断の分かれるところで、これによりシミュレーションの方法も変わってくる。すなわち環境収容力を変動させることにより間接的に個体数を変動させるのか、または一時的な外乱として死亡率・出生率をコントロールすることで個体数を変動させるのかという考え方に繋がってくる。後半で実際の計算例でその考え方を示す。

## 2. 3 個体数予測のコンピュータシミュレーション

つぎに生態学におけるコンピュータシミュレー

ションの有効性について考えてみる。

まずは、個体数の動態機構の分析である。生物の集団には必ずばらつきが存在する。例えば、均一的环境下にあっても、個体間の相互作用によって、密度の偏りが生じたり、また、昆虫のように最終的に成虫として羽化したものの体の大きさにもばらつきがある場合がある。従って、個体数を扱う場合でも、できればこれらの現象を何らかの形でその過程に組み込み、これらの現象の総合されたものとして個体数動態を見るのがより理想的であると考えられる。次の利点としては、時間が挙げられる。生態学の現場における個体数予測は、実際に対象とする生物を捕獲して数を数えたり、対象とする生物を飼育して様々なデータを採取してその上で予測を行うが、これを実行するには膨大な時間と労働力(すなわち費用)を必要とする。しかし、個体数予測を必要とするような場合、予測に時間をかけられないような状況も考えられる。コンピュータシミュレーションにおいては、パラメータさえ決定すればあとは計算機が高速で計算するので非常に時間を短縮することができる。さらに、条件を変えて計算をやり直すことが容易である。実際には近年生態学の分野では、格子モデルによるモデル作り(食物連鎖、ワタリバタ等CAを用いたモデルなど)が多く用いられるようになった例が報告されている(佐藤(1995)、Kubo et al.(1996))。格子モデルでは、解析対象となる空間を区分領域に分割(これを格子と言う)し、格子の状態量を時間の推移とともに変化させる計算を行う。この変化は周囲の格子の状態量との関連で決定され、この関連を定める規則を局所近傍則と言う。この相互関係を繰り返すことで複雑なパターンやふるまいを発生させる。格子点が規則的に配列された格子空間上で、格子点間の相互作用が空間的な近さによって異なるルールとして与えられる。

微分方程式モデルでは、現象に関係する素過程と相互関係が解明されないとモデル化できない。しかし格子モデルは単純なモデルから不規則性も含めた複雑な現象を自己組織化により再現する。ここでは、必ずしも複雑な現象のレベルにおける正

確な情報がなくても現象が再現される可能性がある。しかし、ボトムアップを中心とした個体数予測シミュレーションでは、増殖に関するパラメータのコントロールが難しいことが多く、また、場合によってはルールの決め方が不明確であるという問題点がある。

#### 2. 4 不妊虫放飼事業におけるコンピュータシミュレーションの有効性

ここで本シミュレーションモデルの有効性を検証する際の対象とした不妊虫放飼法について、簡単にその概要を説明する。不妊虫放飼法とは後にアメリカ農務省研究部昆虫局長となったE.F. Knippling博士が考えた害虫防除法で、放射線を照射することにより精子に異常を持つオスを作り出し、それを大量に野外に放すことにより多くのメスが子を産めなくすることで、広範囲にわたって標的とした害虫を完全に根絶やしにする方法である。一般に害虫の駆除では薬剤の散布が考えられるが、薬剤散布を長期間続行すると害虫がその殺虫剤に対して抵抗性を獲得するようになる。また多量の薬剤散布は天敵なども同時に殺してしまうため周辺の生態系に与える影響が大きいほか、残留農薬が環境汚染を引き起こす恐れもある。また薬剤散布では一匹残らず根絶することは困難である(垣花, 1998)。このように多くの利点があるが、そのためには大量の不妊虫を定期的に数年間に渡って生産することが必要であり、またその不妊虫(あるいは蛹)を効果的な時期に効果的な場所に散

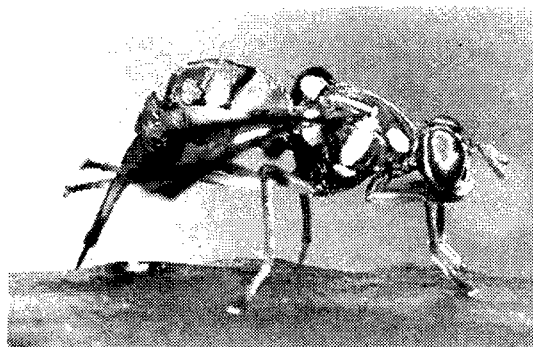


図2 ウリミバエの成虫

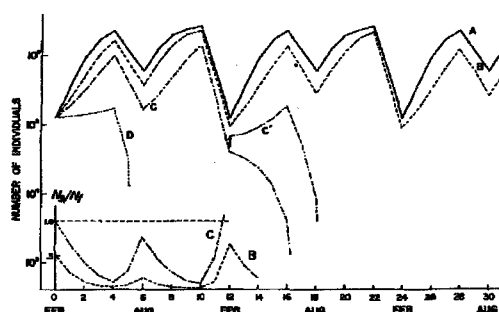
布する必要がある。本手法はアメリカ本土において家畜に重大な被害を与えるラセンウジバエの根絶に適用されて効果をあげその名を知られるようになった。その後、日本にも紹介され、この方法を用いて沖縄諸島に生息するウリミバエの根絶に応用された。ウリミバエ (melon fly, *Dacus cucurbitae*) は、1919年に八重島群島で初めて記録され、その後の曲折を経て70年には久米島への侵入が確認された。その後急速に分布域を広げ沖縄本島でも確認されるようになった。メスは産卵管を使って寄生植物の果実に卵を産みつける。孵化した幼虫は果実内を食い荒らし、その果実はもはや食用とはならない。しかし問題なのはウリミバエは植物検疫上、最も侵入の警戒を有する害虫の一種であり、南西諸島の農作物を本土に出荷するためにはウリミバエを1匹残らず根絶する必要があった。

ウリミバエ根絶のためのプロジェクトでは様々な報告がされているが(伊藤(1980)、小山(1994)、小山重郎(1994))、本報告では主としてIto(1977)の報告を参考に検証を行う。なお、本報告においては、Itoの報告したシミュレーションモデルをItoモデルと表記する。Itoモデルでは、

◆ 個体数のデータは久米島で実際に得られたものを使っている。

◆ ウリミバエの1世代のサイクルを1ヵ月と考え、ロジスティック方程式を用いて、1ヵ月毎の個体数を求めるが、夏、冬の個体数の激減期には一部強制的に減少させる時期がある。

モデルは個体数増加の割合における密度依存の減少、多様な交尾や野生メスと不妊、普通オスとのランダムな出会いを含んでおり、それらは比較的簡単に表されているにも関わらず、モデルは不妊虫放飼法の主な特徴を表現していると考えられる。図3にItoが行った不妊虫放飼によるウリミバエ根絶のシミュレーション結果を示す。このモデルはロジスティックをベースにして簡素で非常によく出来たモデルであるが、環境収容力は一定で、夏・冬は死亡率を上げて計算している。この環境収容力が変動しないという考え方は議論の余地の残るところである。



(A : 不妊虫放飼なし,  
B : 不妊虫 : 野生虫 = 0.5 : 1, C : 1 : 1 D : 2 : 1)

図3 Itoモデルによる不妊虫放飼結果のシミュレーション

### 3. パラメータ依存シミュレーションモデル

#### 3. 1 概要

筆者らが本報告以前に実施したコンピュータシミュレーションモデルの概要について述べる。

ここで作成したモデルは、環境収容力を一定として考え、季節的に変動する死亡率・出生率を基本パラメータとすることにより全体の個体数を変動させた。また、ウリミバエについての様々な生態系のデータを収集し(Iwahashi, 1976, Ito, 1977, 仲盛, 1993)それをモデルに組み込むことでより現実的なモデルの構築を目指した。具体的には、計算機上に仮想のセルに区切ったフィールドを作成し、そこに初期個体をランダムに配置し、それらの個体は各々ランダムに仮想フィールド上を移動し、交尾し、加齢し、産卵し、死亡する。このパラメータの算定には可能な限りウリミバエの生態からパラメータを算定し用いた。

その一部を表1に示す。また検証のために図4に示される久米島におけるウリミバエの個体数の観察結果を基に補間して変動データを作成した。カーブの形は同様に保ちながら、個体数は1/20にスケールダウンして用いた。まず図4のカーブを目標に自然の状態でのこのカーブを再現するシミュレーションを行った。個体をそれぞれランダムに活動をさせた結果の出力として、ウリミバエ個体数変

表1 野生及び放射線照射ウリミバエ比較データ

個体数推定	個体数(ha)	生存率(5日)
石垣島A6月	1359, 1222, 983	0.226, 0.407, 0.277
石垣島B6月	1220, 1048, 960	0.318, 0.403, 0.428
久米島11月	2611	0.651
孵化率	卵の約90%(野生)	
性的競争力	0.75	
産卵開始時期	野生: 孵化後20日、100日産卵 増殖: 10日から40日まで	
寿命	夏: 2~3週間、冬: 2ヶ月以上のこともある	
一生	卵~孵化: 1日 幼虫~蛹: 1週間 蛹~成虫: 10日	
個体数密度	人家、畑: 約622匹、山間部: 約5.5匹	
総産卵数/雌1匹	野生虫	増殖虫
	0~50にピーク	60前後にピーク
産卵回数	0~5回	15~30回
交尾前機関	10~15日齢にピーク	5~10日齢にピーク
交尾回数	2回ばピーク	野生よりは多い
生存日数	雄: 125~225日	100~150日
	雌: 75~200日	100~125日
平均交尾開始日	羽化後21日	羽化後9日
平均交尾間隔	26.4日	18.2日

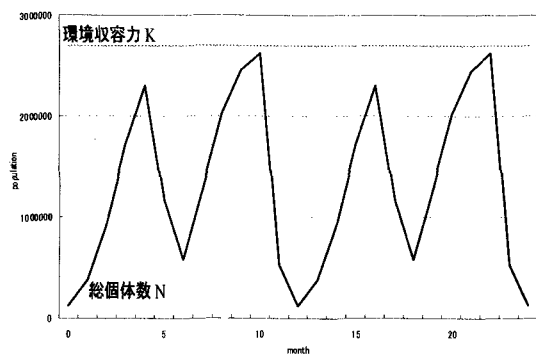


図4 久米島におけるウリミバエの個体数の変動 (Ito, 1977)

動シミュレーションを行った。またそのアルゴリズムを図5に示す。このシミュレーションはすべて1匹1匹の独立した個々が個体データをもとに活動するボトムアップシミュレーションであり、ハエ1匹が卵、幼虫、蛹、羽化、成虫、飛翔、外乱による死亡、寿命による死亡を経るので、シミュレー

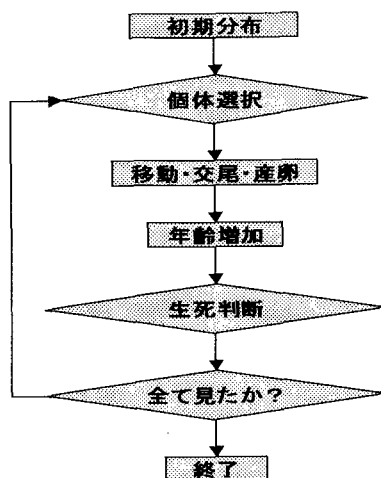


図5 パラメータ依存シミュレーションの計算アルゴリズム

ションの数は1万5千匹ぐらいが計算の上限であった。

### 3. 2 シミュレーション結果

前述のモデルは、表1に示すようにウリミバエの生態系について調べて実際に合ったデータを多く用い、それをもとにウリミバエの活動範囲を含めてその一生を再現したが、主要パラメータ間の関係以外はその相互関係を考慮していないため、各データの個体数変動への詳しい影響が明確ではない。また、ここでは環境収容力は一定で変動しないという考え方をとったため、生息条件の変動に伴い、季節ごとに産卵率、死亡率を独立パラメータとして変化させて実データに追従させた。その結果、図6に示すように急激な変動に対し、上限、下限では図4のカーブと形が一致しているが、その他説明がしにくい微小の変動が現れている。このシミュレーションで個体数変動の際に生じるノイズのコントロールが出来なかった理由として、一度に多くのパラメータを組み込んだため、各パラメータの独立の効果が不鮮明になったという問題点が考えられる。したがって、全体の個体数のコントロールでは4章で取り上げる密度依存を取り入れたシミュレーション法について説明する。

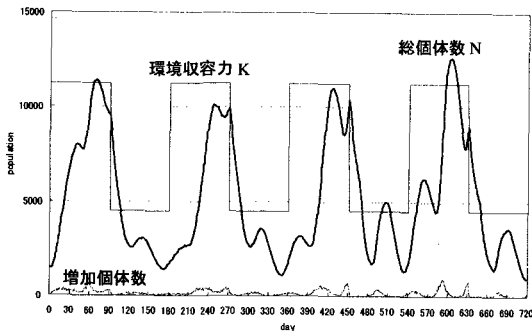


図6 パラメータ依存によるウリミバエの個体数予測

#### 4. 密度依存シミュレーションモデル

##### 4. 1 シミュレーションモデルの概要

密度依存と年齢構成を考慮した個体数予測コンピュータシミュレーションモデルを作成する。3章に述べたパラメータ依存モデルとの相違点は、まず第一に密度効果の効き方が違う点が挙げられる。パラメータ依存のモデルでは、環境収容力を境として、それを超えなければ個体を生み続け、超えたら個体を生まないというように不連続に密度効果を考えていたが、このモデルにおいてはロジスティック方程式を密度効果をルールとして取り入れた。すなわち、環境収容力に近づくにつれて増殖率が減少していくというルールを与えた。密度依存モデルの計算アルゴリズムを図7に示す。ここでは各パラメータの効果を確認するために、モデルに順にパラメータを組み込んでいくことでそれらの効果をみた。まず、ロジスティック差分モデルをもとに個体の集団に個性を持たせた時の個体数変動予測を行い、安定して稼動することを確認した後、個体集団に年齢構成を持たせて個体数予測シミュレーションを行った。その結果を図8に示す。ここでは個体数は環境収容力の少し手前で振動し、収束していく。これは計算における支配方程式であるロジスティック差分方程式が、ある一定の個体数の時には一定の増加数になるところからくる。すなわち、その結果、環境収容力に達せ

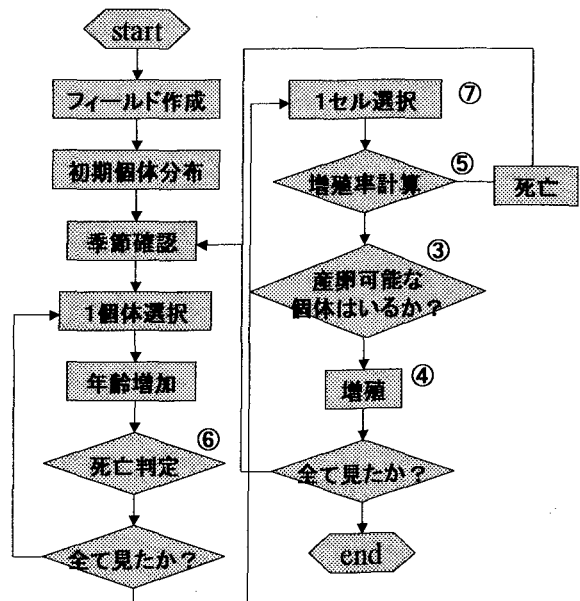


図7 密度依存シミュレーションの計算アルゴリズム

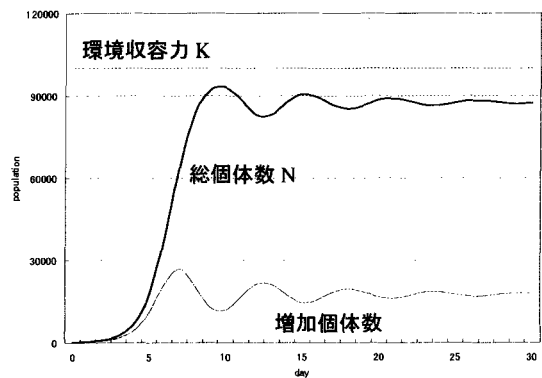


図8 年齢構成を持つ個体集団の個体数予測

ずに、個体数は収束する。このことに関してはもし必要であれば計算上の換算を行う必要がある。モデルの中に世代の分布が反映されていれば、例えば外乱によってある世代に集中的に被害が生じたときの個体群動態や、その世代の分布を見ることで個体の密集や分散を見ることが出来る。

つぎに環境収容力が周期的に変化する場合の個体数の変動についてのシミュレーションを行った。このシミュレーションでは卵の孵化までの期間が考慮されており、それが潜伏期間、すなわち時間

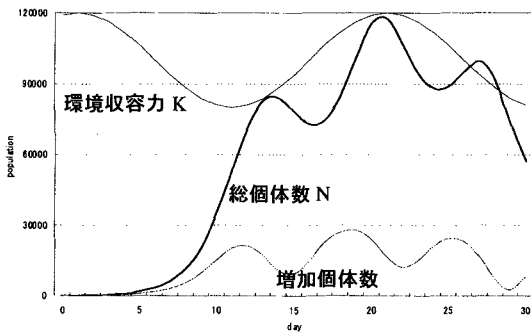
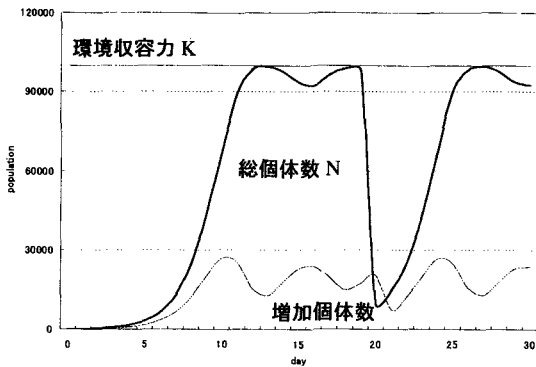
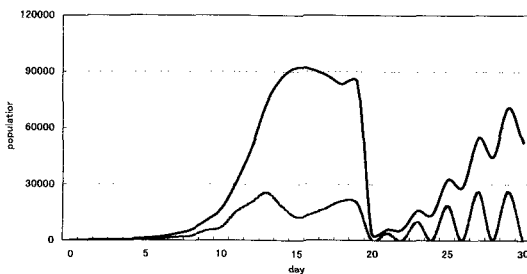


図9 環境収容力が周期的に変動する場合の個体数予測



(a) 集団全体に外乱があった場合



(b) 産卵可能世代に外乱があった場合

図10 一時的な外乱を受ける集団の個体数予測

遅れとなって環境の変動に追従することになる。環境収容力の変動によって個体数も変動するが、時間遅れがあるために、環境収容力よりも低い個体

数で安定して変動せず環境収容力に近づいたり、環境収容力を超えて行き過ぎが生じたりしている。これ以上環境の変動の周期が短くなると、個体数変動はついていけなくなり、環境変動は時間的に平均した形の効果となり影響は小さくなる。

次に大きな外乱が生じたときにその個体集団に与える影響とその回復の予測を行った。ここでは一時的に個体を大量に死亡させたときの結果を図10に示す。外乱が産卵可能の世代に直接ふりかかる場合と全体にふりかかる場合とでは、その応答に違いが出ることが観測される。

以上作成し、検証したモデルを、ウリミバエの放飼プロジェクトのデータに適用することでモデルの有効性を示す実験を行う。特に久米島での個体数変動データに着目し、久米島のウリミバエ個体数変動を再現する。さらに、不妊虫放飼のシミュレーションも行う。

## 5. 分布を考慮したモデル

### 5. 1 モデルの概要

4章で述べた密度依存を考慮したモデルに加え、さらに地域（セルで表現）ごとに増殖率を変えて計算するモデルについて説明する。このモデルはシミュレーションの対象となる地域に対して環境収容力に差をもたせることが可能で、局所的に異なって変動する増殖率を有することで、地域によって生息密度が異なる実例に適用できるより実際的なモデルと考えられる。ここで本シミュレーションで用いられた久米島をセルに分割し、島におけるウリミバエの個体数分布を実際の分布に合わせた結果を図11に示す。これは文献を参考にしてシミュレーション用に作成したもので、密度分布はかなり荒く表されている。これらのセル間では各個体が生息数の比に対して一定の割合で流出、および流入が可能である。これらの分布の偏りを久米島における地域ごとのウリミバエに対する環境収容力の差と考え、これを参考に島全体をセル分割しそれぞれのセルの環境収容力を決定しシミュレーションを実施した。この環境収容力の分布を



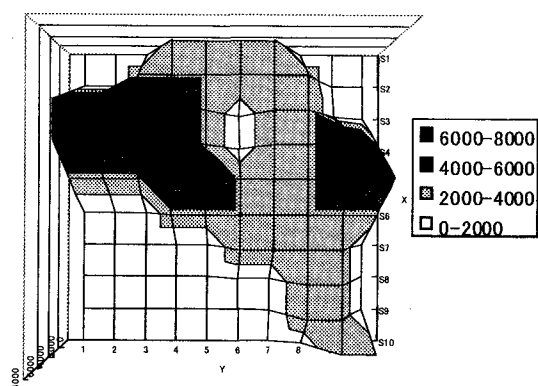


図11 久米島概形と久米島におけるウリミバエ分布

考慮したシミュレーションにおける個体数の変動を図12に示す。ここでの検証用のウリミバエの270万匹をピークとする二山のカーブは図4を参考に、久米島の不妊虫放飼を行わないときの自然状態での個体数変動を繰り返すように環境収容力を周期変動させてシミュレーションに取り込んだ。図12において自然の状態での個体数変動が安定して再現されることを確認した後、不妊虫を放飼して根絶のためのシミュレーションを行った。図13には実際に久米島で不妊虫が放飼された場所を示す。シミュレーションはこのようなウリミバエの分布を全く考慮せずに島全体にわたって一様に放飼した場合と、図13に示される分布を考慮して、場所

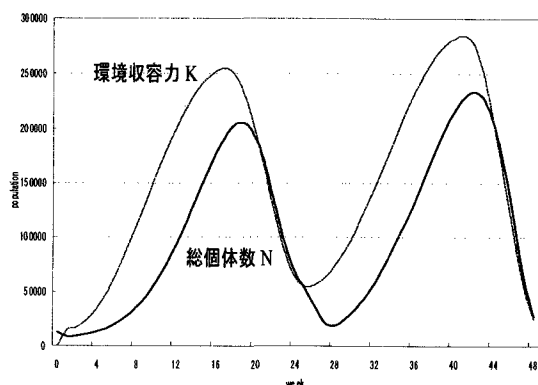


図12 久米島におけるウリミバエの個体数の変動シミュレーション

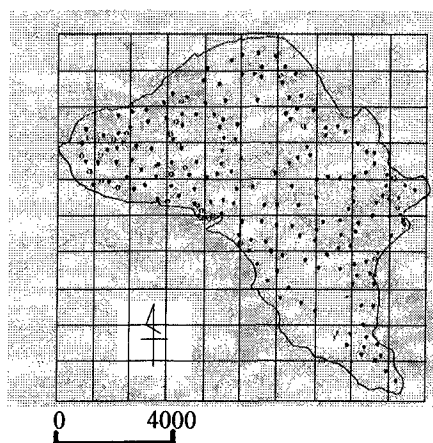
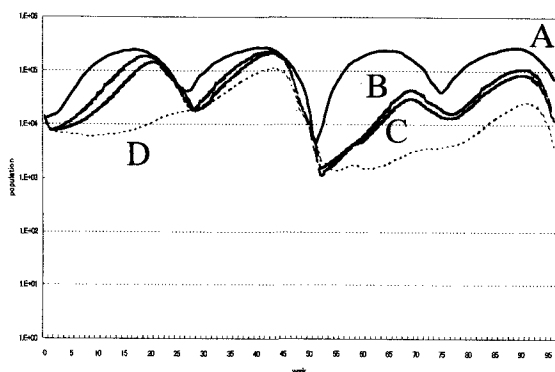
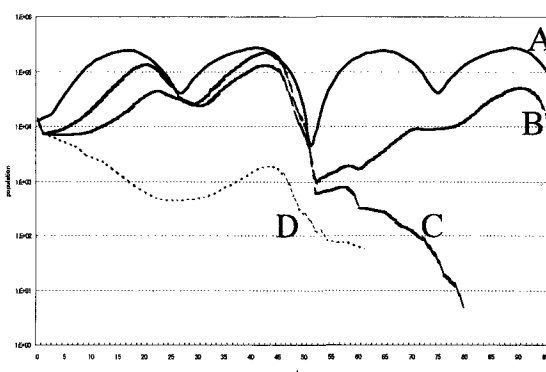


図13 久米島における不妊虫の放飼場所 (伊藤、1977)



(a) 分布なし



(b) 分布考慮

(A : 不妊虫放飼なし, B : 不妊虫 : 野生虫 = 0.5 : 1, C : 1 : 1 D : 2 : 1)

図14 久米島における不妊虫放飼シミュレーション

(セル)により不妊虫の放飼数に差をもたせた場合の両方に対して実施した。その結果を図14に示す。図14(a)は放飼の場所を島全体で一定として行ったもので、同じく(b)は図13に示されるように、実際の根絶事業での放飼場所を参考にして放飼を行った結果である。図11と図13を比較すると、比較的密度の高いところに効果的に不妊虫を放飼されたことがわかる。これを図14のシミュレーションの結果と比べてみると、放飼の場所が重要なことがわかる。ここでは実施しなかったが、放飼の時期もまた大きな影響を与えることが予想される。不妊虫の比率が高くなるほど根絶までの期間が短くなることがわかる。

## 6. 結 論

- ①個体数予測のコンピュータシミュレーションモデルにおいて、密度に依存性する増殖率をロジスティック方程式で計算する新たなモデルを提案した。
- ②提案したモデルに関して、モデルの主要パラメータの効果を確認する実験を行い、システムを構築した。このことにより、年齢構成を入れてもどこおらず変動する個体数変動モデルを作成した。すなわち、自然の条件では従来のモデルと同様な結果が得られる上に、特定の外乱などに応答する要素も観測できるシミュレーションモデルを作成した。
- ③環境収容力の分布に差を持たせ、個体に個性をもたせたモデルを作成することで、多くの項目を観測できるより現実的なモデルを作成した。
- ④本手法をウリミバエ根絶事業の観測データ例および研究例に適用しその結果を比較して有効性を確認した。

## 参 考 文 献

- 伊藤嘉昭『虫を放して虫を滅ぼす』中公新書, 1980.
- 巖佐庸『数理生物学入門』HBJ出版, 1990.
- 巖佐庸「数理生態学の魅力 生態学で、数理モデルはどのような役割を果たせるのか」、『日本生態学会誌』45号, 1995.
- 巖佐庸『数理生態学』共立出版, 1990.
- 内田俊郎『動物個体群の生態学』京都大学学術出版会, 1998.
- 垣花廣幸「講演—不妊虫放飼法によるウリミバエの根絶」、『日本原子力学会誌』Vol.40, No.2, 1998.
- 小山重郎『530億匹の戦い』築地書館, 1994.
- 小山重郎「日本におけるウリミバエの根絶」、『日本応用動物昆虫学会』第38巻, 4号, p.219-229, 1994.
- 佐藤一憲「生態学における格子モデル—ペア近似の有効性—」、『日本生態学会誌』45, 1995.
- 仲盛広明・志賀正和・金城邦夫「沖縄本島南部のウリミバエ不妊虫放飼下におけるホット・スポット出現地域の特徴」、『日本応用動物昆虫学会』第37巻, 第3号, p.123-128, 1993.
- Bascompte, J. and Sole, R.V., "Spatially induced bifurcations in single-species population dynamics", *Journal of Animal Ecology*, Vol.63, 1994.
- Deriso, R.B., "Harvesting Strategies and Parameter Estimation for an Age-Structured Model", *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol.37, 1980.
- Hassel, M.P., "Density-dependence in single-species populations", *Journal of Animal Ecology*, Vol.44, 1975.
- Ito, Y., "A model of sterile insect release for eradication of the melon fly, *Dacus cucurbitae*", *Applied Entomology and Zoology*, Vol.12, No.4, pp. 303-312, 1977.
- Iwahashi, O. Ito, Y. and Zukeyama, H., "A progress report on the sterile insect releases of the melon fly, *Dacus cucurbitae* COQUILLET on Kume Is., Okinawa", *Applied Entomology and Zoology*, Vol. 11, No.3, pp.182-201, 1976.
- Kubo, T. et al., "Forest spatial dynamics with gap expansion: total gap area and gap size distribution", *Journal of theoretical biology*, Vol. 180, 1996.
- May, R.M., Conway, G.R., Hassell, M.P. and Southwood, T.R.E., "Time-delays, density-dependence and single-species oscillations", *J. Anim. Ecol.*, 43, 1974.

**Key Words (キー・ワード)**

**Population Dynamics (個体数変動), Computer Simulation (コンピュータシミュレーション), Sterile Insect Release (不妊虫放飼), Melon Fly (ウリミバエ), Eradication (根絶)**

A Computer Simulation Model to Predict the Population Dynamics by  
Considering Density-dependence and Age Structure:  
Population Estimation in a Project to Eradicate the Melon Fly,  
*Dacus Cucurbitae* Coquillett by Sterile Insect Release

Shigeru Aomura\* and Hiroshi Takakura\*\*

\*Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University

\*\*Toshiba Corp.

*Comprehensive Urban Studies*, No.72, 2000, pp.249– 260

To analyze the population dynamics is considered to be one of the most important problems in ecology, and a number of mathematical studies have been done on it. But as most of these studies deal with purely theoretical and statistical aspects, few can be applied to predict the actual process of specified area, specified species where mutual interaction of individuals or groups and local environment is important. In recent years, as computers have become more powerful, more elaborate models and estimation schemes have become feasible. On such a background, in this paper, a model based upon both the mathematical and computer simulation approach is presented. In the model, the density-dependent effects in population growth are derived from the Logistic difference equation for each small local areas and age structure is taken into consideration. This computer simulation model is applied to predict fluctuations in the population density of the melon fly, *Dacus cucurbitae* Coquillett, during the course of a project to eradicate them by releasing the sterile insects on Kume Is., Okinawa. The structure of the model is described and results of computer simulation are illustrated.